



Rola homogenizacji w predykcji nośności opakowań z tektury falistej – przegląd metod i zastosowań

The role of homogenization in predicting the load-bearing capacity of corrugated packaging – a short review of methods and applications

TOMASZ GARBOWSKI

DOI: 10.15199/54.2024.5.1

Artykuł omawia kluczową rolę homogenizacji w predykcji nośności opakowań z tektury falistej, podkreślając metody i techniki stosowane w tym procesie. Homogenizacja pozwala na uproszczenie złożonej struktury tektury falistej, co prowadzi do zwiększenia efektywności obliczeń i precyzyjniejszej predykcji wytrzymałości. Przegląd przedstawia różnorodne metody homogenizacji, takie jak metoda Voigta-Reussa-Hill, Mori-Tanaki oraz metoda samouzgodniona oraz ich zastosowanie w modelowaniu właściwości mechanicznych. W pracy omówiono także zastosowanie metod numerycznych, w tym metody elementów skończonych (MES), które porównano z metodami eksperymentalnymi. Praktyczne zastosowania homogenizacji zilustrowano za pomocą studiów przypadków, ukazując korzyści w projektowaniu i optymalizacji opakowań. Przegląd wskazuje również na obecne wyzwania i przyszłe kierunki badań, podkreślając znaczenie wyników dla przemysłu opakowaniowego, zwłaszcza w kontekście poprawy wytrzymałości, efektywności materiałowej oraz optymalizacji kosztów produkcji.

Słowa kluczowe: homogenizacja, tektura falista, metoda elementów skończonych, wytrzymałość mechaniczna, przemysł opakowaniowy

This article discusses the crucial role of homogenization in predicting the load-bearing capacity of corrugated cardboard packaging, emphasizing the methods and techniques used in this process. Homogenization simplifies the complex structure of corrugated cardboard, leading to increased computational efficiency and more precise strength predictions. The review presents various homogenization methods, such as the Voigt-Reuss-Hill, Mori-Tanaka, and self-consistent methods, and their application in modeling mechanical properties. The article also discusses the use of numerical methods, including the finite element method (FEM), and compares them with experimental methods. Practical applications of homogenization are illustrated through case studies, highlighting the benefits in the design and optimization of packaging. The review also identifies current challenges and future research directions, emphasizing the importance of the results for the packaging industry, particularly in terms of improving strength, material efficiency, and production cost optimization.

Keywords: homogenization, corrugated board, finite element method, mechanical strength, packaging industry

Homogenizacja – wprowadzenie

Homogenizacja, jako narzędzie umożliwiające przekształcenie złożonych struktur materiałowych w modele o jednorodnych właściwościach mechanicznych, jest kluczowym elementem analizy tektury falistej [22, 23]. Proces ten pozwala na uproszczenie skomplikowanej geometrii tektury, co prowadzi do zwiększenia efektywności obliczeń [27] oraz precyzyjniejszej predykcji nośności [32].

W artykule przedstawiono różnorodne metody homogenizacji, obejmujące zarówno klasyczne podejścia analityczne, jak i nowoczesne techniki numeryczne. Szczególną uwagę poświęcono ocenie skuteczności tych metod w przewidywaniu właściwości mechanicznych i nośności opakowań, porównując je z wynikami uzyskanymi metodami eksperymentalnymi. Praktyczne zastosowania homogenizacji zilustrowano za pomocą studiów przypadków, ukazujących korzyści wynikające z jej wykorzystania w projektowaniu i optymalizacji opakowań z tektury falistej.

Przegląd ten ma również na celu identyfikację obecnych wyzwań związanych z homogenizacją tektury falistej oraz wskazanie przyszłych kierunków badań, które mogą przyczynić się do dalszego rozwoju tej dziedziny. Podkreślono znaczenie wyników przeglądu dla przemysłu opakowaniowego, szczególnie w kontekście poprawy wytrzymałości, efektywności materiałowej oraz optymalizacji kosztów produkcji.

Dzięki szczegółowemu zbadaniu tych aspektów, niniejszy artykuł dostarcza naukowcom, inżynierom i projektantom kompleksowych informacji oraz gromadzi niezbędną wiedzę na temat homogenizacji oraz jej kluczowej roli w procesie tworzenia wytrzymałych i efektywnych opakowań z tektury falistej.

Artykuł rozpoczyna się od przedstawienia celu i znaczenia przeglądu, wyjaśniając kluczową rolę homogenizacji w analizie tektury

Dr hab. inż. T. Garbowski, prof. UPP (tomasz.garbowski@up.poznan.pl), Uniwersyteckie Centrum Ekomateriałów, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu



falistej. Następnie omawia strukturę i właściwości tego materiału, podkreślając jego zastosowania w różnych branżach.

W części dotyczącej homogenizacji, wyjaśniono definicję, znaczenie oraz różne metody tego procesu, takie jak metoda Voigta-Reussa i Mori-Tanaki.

Kolejna część skupia się na zastosowaniu homogenizacji do tektury falistej, opisując szczegółowo proces oraz uzyskiwane właściwości mechaniczne. Następnie, artykuł analizuje metody numeryczne, w tym metodę elementów skończonych, oraz porównuje je z metodami eksperymentalnymi.

W sekcji studiów przypadków przedstawiono praktyczne aplikacje homogenizacji oraz dyskutowano korzyści i wyzwania związane z jej implementacją. Przyszłe kierunki badań obejmują nowe techniki oraz możliwości zastosowania homogenizacji w innych materiałach kompozytowych. Artykuł kończy się podsumowaniem głównych punktów oraz dyskusją na temat znaczenia wyników dla przemysłu opakowaniowego, podkreślając korzyści związane z poprawą wytrzymałości, efektywności materiałowej i optymalizacją kosztów produkcji.

Tektura falista i jej zastosowanie w opakowaniach

Struktura i właściwości tektury falistej

Tektura falista jest jednym z najpowszechniej stosowanych materiałów opakowaniowych ze względu na swoją wytrzymałość, lekkość oraz możliwość recyklingu. Jej unikatowa struktura składa się z kilku warstw – dwóch zewnętrznych warstw płaskiego papieru (liner) oraz jednej lub więcej warstw pofalowanego papieru (fluting), umieszczonych między nimi. Taka konstrukcja zapewnia wysoką sztywność i wytrzymałość na ściskanie, przy jednoczesnym zachowaniu niskiej masy.

Właściwości mechaniczne tektury falistej wynikają z kombinacji materiału użytego do produkcji oraz geometrii fal. Wysokość, kształt i liczba fal mają kluczowy wpływ na wytrzymałość materiału. Zazwyczaj używa się trzech głównych typów fal: E, B i C, które różnią się wysokością i liczbą fal na jednostkę długości. W praktyce, różne kombinacje tych fal (np. BC, EB) są stosowane w celu optymalizacji właściwości mechanicznych opakowań do specyficznych zastosowań.

Papier używany do produkcji tektury falistej również odgrywa istotną rolę w kształtowaniu jej właściwości. Parametry, takie jak gramatura, wytrzymałość na rozciąganie oraz sztywność, wpływają na końcową wytrzymałość tektury. Proces produkcji, w tym technologia klejenia warstw, także ma znaczenie, gdyż poprawne połączenie warstw jest kluczowe do uzyskania pożądaných właściwości mechanicznych.

Zastosowania opakowań z tektury falistej

Opakowania z tektury falistej znajdują szerokie zastosowanie w wielu branżach, ze względu na swoją wszechstronność i do-

skonałe właściwości ochronne. Jednym z głównych zastosowań jest przemysł spożywczy, gdzie tektura falista służy do produkcji pudełek na produkty takie jak owoce, warzywa, napoje oraz różnorodne przetwory. Wysoka wytrzymałość na ściskanie i zdolność amortyzacji sprawiają, że tektura falista jest idealnym materiałem do transportu delikatnych towarów.

W sektorze e-commerce opakowania z tektury falistej odgrywają kluczową rolę w ochronie produktów podczas transportu. Ze względu na rosnącą popularność zakupów online, zapotrzebowanie na trwałe i lekkie opakowania stale rośnie. Tektura falista zapewnia nie tylko ochronę mechaniczną, ale także jest łatwa do personalizacji i brandowania, co dodatkowo zwiększa jej atrakcyjność w tej branży.

Przemysł elektroniczny również korzysta z właściwości tektury falistej, używając jej do opakowań na delikatne urządzenia elektroniczne. Dzięki możliwości dostosowania struktury tektury do specyficznych wymagań, możliwe jest tworzenie opakowań, które chronią urządzenia przed wstrząsami i uszkodzeniami mechanicznymi.

Ponadto, opakowania z tektury falistej znajdują szerokie zastosowanie w logistyce i magazynowaniu. Są lekkie, co redukuje koszty transportu, a jednocześnie wystarczająco wytrzymałe, by zapewnić bezpieczeństwo przechowywanych towarów. Możliwość łatwego recyklingu sprawia, że tektura falista jest materiałem przyjaznym dla środowiska, co zyskuje na znaczeniu w kontekście zrównoważonego rozwoju.

Wszystkie te czynniki sprawiają, że tektura falista jest nieodzownym materiałem w nowoczesnym przemyśle opakowaniowym, a jej zastosowania stale się rozwijają wraz z postępem technologicznym i zmieniającymi się potrzebami rynku.

Koncepcja homogenizacji

Definicja i znaczenie homogenizacji

Homogenizacja jest procesem matematycznym i fizycznym, który polega na przekształceniu złożonej, heterogenicznej struktury materiału w jednorodny model o równoważnych właściwościach mechanicznych. W kontekście tektury falistej, która składa się z warstw płaskiego i falistego papieru, homogenizacja pozwala na uproszczenie analizy i modelowania tego materiału. Dzięki temu można skutecznie przewidywać zachowanie się tektury pod różnymi obciążeniami, bez konieczności uwzględniania skomplikowanej geometrii każdej warstwy.

Znaczenie homogenizacji wynika z jej zdolności do redukcji złożoności problemu inżynierskiego. Tektura falista, ze względu na swoją wielowarstwową strukturę, jest materiałem trudnym do analizowania przy użyciu tradycyjnych metod analitycznych. Homogenizacja pozwala na zdefiniowanie równoważnych właściwości mechanicznych, takich jak moduł sprężystości czy wytrzymałość na ściskanie, które można następnie wykorzystać w prostszych modelach obliczeniowych [24, 25]. To nie tylko przyspiesza proces



analizy, ale również zwiększa jego dokładność i wiarygodność, co jest kluczowe w projektowaniu wytrzymałych opakowań.

Metody homogenizacji

Istnieje wiele metod homogenizacji, które mogą być stosowane w zależności od specyfiki analizowanego materiału i oczekiwanego poziomu dokładności. Do najczęściej stosowanych metod należą:

Metoda Voigta-Reussa-Hill. Jest to jedno z najprostszych podejść do homogenizacji, które zakłada liniową kombinację właściwości poszczególnych składników materiału. Metoda Voigta opiera się na założeniu, że odkształcenie jest stałe w całym materiale, podczas gdy metoda Reussa zakłada stałe naprężenie. Połączenie obu tych metod, zaproponowane przez Hill'a, daje bardziej realistyczne wyniki, które są często używane jako przybliżenie dla materiałów kompozytowych [17, 41];

Metoda Mori-Tanaki. Uwzględnia wpływ mikrostruktury materiału na jego właściwości makroskopowe. Jest szczególnie użyteczna w przypadku materiałów złożonych, gdzie elementy o różnej sztywności są rozmieszczone w matrycy. Metoda ta pozwala na dokładniejsze oszacowanie właściwości efektywnych poprzez uwzględnienie kształtu, orientacji i rozmieszczenia wtrąceń [14, 31, 35];

Metoda samouzgodniona. Jest to zaawansowana technika homogenizacji, która iteracyjnie rozwiązuje problem odkształceń i naprężeń w materiale [2, 10, 16, 20, 36, 37]. Metoda ta jest bardziej skomplikowana obliczeniowo, ale daje bardzo dokładne wyniki dla materiałów o złożonej mikrostrukturze [24, 25, 30, 34, 42]. Jest często stosowana w analizach numerycznych, takich jak metoda elementów skończonych (MES), gdzie wymagana jest wysoka precyzja [1, 7, 11, 21, 26, 38, 39];

Metoda homogenizacji matematycznej. Polega na wykorzystaniu zaawansowanych technik matematycznych, takich jak asymptotyczna analiza wieloskalowa [3, 18, 45], do analizy materiałów o periodycznej mikrostrukturze [28, 29, 33]. Metoda ta pozwala na uzyskanie równoważnych równań różniczkowych, które opisują zachowanie się materiału w skali makroskopowej, bazując na jego mikrostrukturze.

Każda z tych metod ma swoje zalety i wady, a wybór odpowiedniej techniki zależy od specyficznych wymagań analizy oraz dostępnych zasobów obliczeniowych. Homogenizacja stanowi fundamentalne narzędzie w nowoczesnej inżynierii materiałowej, umożliwiając efektywne i dokładne modelowanie złożonych materiałów kompozytowych, takich jak tektura falista.

Zastosowanie homogenizacji do tektury falistej

Proces homogenizacji tektury falistej

Homogenizacja tektury falistej jest kluczowym krokiem w przekształceniu złożonej struktury tego materiału w uproszczony model

o jednorodnych właściwościach mechanicznych [22, 23, 30, 42, 43]. Proces ten zaczyna się od dokładnej analizy mikrostruktury tektury, która składa się z warstw pofalowanego i płaskiego papieru. W pierwszym etapie, szczegółowo analizuje się geometrię fal, ich wysokość, szerokość, oraz kąt nachylenia, a także właściwości mechaniczne użytych materiałów.

Następnie, przy użyciu wybranej metody homogenizacji, każda z warstw tektury jest przekształcana w równoważny model jednorodny. Na przykład, w metodzie Mori-Tanaki, modeluje się pofalowaną warstwę jako ciągłą matrycę z wtrąceniami o określonych właściwościach mechanicznych. W wyniku tego procesu uzyskuje się efektywne właściwości mechaniczne, takie jak moduł Younga, moduł ścinania oraz wytrzymałość na ściskanie, które są reprezentatywne dla całego materiału [1, 4–9, 11, 12, 15, 34, 40].

Kluczowym elementem homogenizacji tektury falistej jest dokładne odwzorowanie interakcji między warstwami. Proces klejenia warstw, grubość kleju oraz jego właściwości mechaniczne mają znaczący wpływ na końcowe właściwości tektury. Modele numeryczne często uwzględniają te czynniki, aby zapewnić jak największą zgodność z rzeczywistością. Ostatecznie, uzyskane właściwości efektywne są wykorzystywane w modelach makroskopowych, które pozwalają na szybkie i precyzyjne analizy wytrzymałości tektury falistej w różnych warunkach obciążeniowych.

Właściwości efektywne materiału

W wyniku procesu homogenizacji uzyskuje się szereg właściwości efektywnych, które charakteryzują jednorodny model tektury falistej. Do najważniejszych właściwości należą:

Moduł sprężystości (Moduł Younga). Jest to miara sztywności materiału w odpowiedzi na naprężenie osiowe. Homogenizowany moduł sprężystości tektury falistej uwzględnia wpływ zarówno warstw płaskich, jak i pofalowanych, co pozwala na precyzyjne oszacowanie zachowania materiału pod obciążeniem ściskającym lub rozciągającym;

Moduł ścinania. Ta właściwość opisuje zdolność materiału do przenoszenia naprężeń ścinających. W kontekście tektury falistej, moduł ścinania odgrywa kluczową rolę w ocenie odporności na deformacje boczne, które mogą występować podczas manipulacji i transportu opakowań;

Wytrzymałość na ściskanie. To jeden z najważniejszych parametrów dla tektury falistej, szczególnie w kontekście jej zastosowań opakowaniowych. Proces homogenizacji pozwala na dokładne przewidzenie tej właściwości, uwzględniając zarówno wpływ geometrii fal, jak i właściwości materiałowe warstw;

Współczynnik Poissona. Jest to stosunek odkształceń poprzecznych do osiowych i jest istotny przy ocenie zachowania tektury falistej pod obciążeniami złożonymi. Homogenizacja umożliwia oszacowanie tego współczynnika, co jest niezbędne do kompleksowej analizy materiału.



Oprócz tych podstawowych właściwości, homogenizacja może również dostarczać informacji o właściwościach dynamicznych materiału, takich jak tłumienie drgań, co jest ważne w kontekście ochrony delikatnych produktów podczas transportu. Dzięki użytym właściwościom efektywnym, tektura falista może być modelowana jako jednorodny materiał w symulacjach numerycznych, co znacząco upraszcza proces projektowania i optymalizacji opakowań.

Uzyskane właściwości efektywne są następnie wykorzystywane do przewidywania zachowania tektury falistej w różnych warunkach obciążeniowych, zarówno statycznych, jak i dynamicznych. Pozwala to na optymalizację konstrukcji opakowań, zwiększając ich wytrzymałość i efektywność materiałową, a także redukując koszty produkcji i wpływ na środowisko.

Jak homogenizacja może wpływać na wytrzymałość i trwałość tektur falistych?

Homogenizacja jest stosowana do uproszczenia modelu numerycznego tektur falistych, przyspieszając analizy numeryczne przy zachowaniu dokładności [22, 23]. Degradacja sztywności tektur falistych zależy od czynników, takich jak rodzaj cięcia, kształt i głębokość bigowania, a także ich pozycja w stosunku do kierunku falowania [26]. Dodatkowo zmiany wilgotności i temperatury mogą wpływać na sztywność i wytrzymałość tektur falistych [13]. Niedoskonałości geometryczne podczas procesu produkcji mogą być uwzględniane w obliczeniach efektywnej sztywności tektur falistych za pomocą numerycznej homogenizacji [36, 37]. Homogenizacja pozwala na przewidywanie zmian właściwości mechanicznych tektury falistej, spowodowanych zmianami wilgotności, na podstawie wpływu wilgotności na podstawowe właściwości materiału włóknistego [44].

Metody numeryczne i analityczne w predykcji nośności

Metoda elementów skończonych (MES)

Metoda elementów skończonych (MES) jest jednym z najpowszechniej stosowanych narzędzi numerycznych w analizie wytrzymałości materiałów, w tym tektury falistej. MES pozwala na modelowanie skomplikowanych struktur i przewidywanie ich zachowania pod różnymi warunkami obciążeniowymi. W kontekście tektury falistej, MES umożliwia szczegółowe odwzorowanie zarówno geometrycznej, jak i materiałowej złożoności tego kompozytu.

W procesie homogenizacji tektury falistej, pierwszym krokiem jest przekształcenie jej heterogenicznej struktury w jednorodny model o równoważnych właściwościach mechanicznych. Następnie, ten uproszczony model jest wykorzystywany w symulacjach MES. Dzięki temu, możliwe jest szybkie i dokładne przeprowadzenie analizy wytrzymałościowej, bez konieczności modelowania każdej war-

stwy tektury osobno. MES pozwala na analizę różnych scenariuszy obciążeniowych, takich jak ściskanie, zginanie czy ścinanie, co jest kluczowe w ocenie nośności opakowań z tektury falistej.

Jednym z głównych zalet MES jest jego elastyczność. Można dostosować siatkę elementów skończonych do skomplikowanych kształtów i warunków brzegowych, co umożliwia dokładne odwzorowanie rzeczywistych warunków użytkowania opakowań. Ponadto, MES pozwala na uwzględnienie nieliniowości materiałowych i geometrycznych, które są istotne w analizie dużych odkształceń i złożonych stanów naprężenia.

Przykłady zastosowania MES w analizie tektury falistej obejmują badania wytrzymałości na ściskanie pionowe, które są kluczowe dla opakowań przeznaczonych do składowania w stosach. MES umożliwia także analizę odporności na uderzenia, co jest istotne w kontekście ochrony produktów podczas transportu. Wyniki symulacji mogą być wykorzystane do optymalizacji konstrukcji opakowań, redukcji masy oraz zwiększenia ich wytrzymałości i trwałości.

Inne metody numeryczne

Oprócz metody elementów skończonych, istnieje szereg innych metod numerycznych, które mogą być stosowane do analizy tektury falistej. Jedną z takich metod jest metoda różnic skończonych (MRS), która jest stosowana głównie do rozwiązywania równań różniczkowych związanych z problemami przepływu ciepła i mechaniki płynów, ale może być także adaptowana do analiz mechanicznych. MRS polega na zastąpieniu równań różniczkowych równaniami różnicowymi, które mogą być łatwiej rozwiązane numerycznie.

Kolejną metodą jest metoda elementów skończonych z homogenizacją, która łączy zalety MES i homogenizacji. W tej metodzie, szczegółowe właściwości mechaniczne homogenizowanego materiału są uwzględniane w modelu MES, co pozwala na bardziej precyzyjną analizę zachowania tektury falistej. Jest to szczególnie użyteczne w przypadku materiałów o złożonej mikrostrukturze, gdzie tradycyjne metody numeryczne mogą nie być wystarczająco dokładne.

Inną interesującą metodą jest metoda meshfree, która, jak sama nazwa wskazuje, nie wymaga użycia siatki elementów skończonych. Metody meshfree, takie jak metoda punktów materialnych (MPM) czy metoda dyskretnych elementów (DEM), pozwalają na modelowanie dużych deformacji i skomplikowanych interakcji między cząstkami materiału. Jest to szczególnie przydatne w analizie tektury falistej pod dużymi obciążeniami dynamicznymi, gdzie tradycyjne metody mogą napotkać problemy z konwergencją.

Warto również wspomnieć o metodach optymalizacji topologicznej, które mogą być stosowane do projektowania i optymalizacji struktury tektury falistej. Dzięki tym metodom, można tworzyć opakowania o zoptymalizowanej geometrii, które są lżejsze, a jednocześnie wytrzymalsze, co ma kluczowe znaczenie w kontekście zrównoważonego rozwoju i redukcji kosztów produkcji.



Wszystkie te metody numeryczne oferują różne podejścia i techniki, które mogą być wykorzystane do analizy i optymalizacji tektury falistej. Wybór odpowiedniej metody zależy od specyficznych wymagań projektu, dostępnych zasobów obliczeniowych oraz oczekiwanej dokładności wyników.

Praktyczne zastosowania i studia przypadków

Przemysł opakowaniowy

Tektura falista jest jednym z najważniejszych materiałów w przemyśle opakowaniowym, a homogenizacja i zaawansowane metody numeryczne odgrywają kluczową rolę w optymalizacji jej wykorzystania. Dzięki procesowi homogenizacji, można skutecznie przewidywać właściwości mechaniczne tektury falistej, co pozwala na projektowanie opakowań o optymalnej wytrzymałości i masie.

W praktyce przemysł opakowaniowy wykorzystuje wyniki analiz numerycznych do projektowania pudełek i innych rodzajów opakowań, które muszą wytrzymać różnorodne warunki transportu i przechowywania. Na przykład, opakowania muszą być odporne na ściskanie, aby nie ulegały deformacji podczas układania ich w stosy. Dzięki homogenizacji, możliwe jest dokładne oszacowanie wytrzymałości na ściskanie tektury falistej, co pozwala na projektowanie opakowań, które spełniają te wymagania.

Ponadto, przemysł opakowaniowy korzysta z symulacji numerycznych, takich jak metoda elementów skończonych (MES), aby analizować zachowanie tektury falistej pod różnymi obciążeniami dynamicznymi, takimi jak uderzenia i wibracje. Symulacje te pozwalają na identyfikację potencjalnych słabych punktów konstrukcji opakowań i wprowadzanie modyfikacji w celu zwiększenia ich trwałości. Na przykład, poprzez analizę MES, można zoptymalizować grubość warstw tektury i geometrię fal, aby zwiększyć odporność na uszkodzenia mechaniczne.

W praktyce przemysł opakowaniowy stosuje również metody optymalizacji topologicznej do projektowania innowacyjnych opakowań. Dzięki temu możliwe jest tworzenie opakowań o bardziej skomplikowanych kształtach, które zapewniają lepszą ochronę produktów przy jednoczesnym zmniejszeniu ilości użytego materiału. To nie tylko redukuje koszty produkcji, ale także ma pozytywny wpływ na środowisko poprzez zmniejszenie ilości odpadów.

Studia przypadków

W celu lepszego zrozumienia praktycznych zastosowań homogenizacji i metod numerycznych w analizie tektury falistej, warto przyjrzeć się kilku konkretnym studiom przypadków.

Studium przypadku 1: Optymalizacja opakowań na urządzenia elektroniczne

W jednym z projektów [19] zespół inżynierów zastosował metodę elementów skończonych do analizy opakowań na delikatne

urządzenia elektroniczne. Celem było zapewnienie maksymalnej ochrony przy minimalnym zużyciu materiału. Poprzez symulacje numeryczne, zidentyfikowano krytyczne punkty, w których tektura falista mogła ulec uszkodzeniu podczas transportu. W wyniku przeprowadzonych analiz, zoptymalizowano geometrię fal i grubość warstw tektury, co pozwoliło na stworzenie opakowania, które było o 20% lżejsze, a jednocześnie bardziej wytrzymałe na uderzenia.

Studium przypadku 2: Recykling i zrównoważony rozwój

W innym projekcie skupiono się na wykorzystaniu odzyskanej w procesie recyklingu tektury falistej do produkcji nowych opakowań [19]. Zastosowano proces homogenizacji, aby oszacować właściwości mechaniczne materiału pochodzącego z recyklingu. Wyniki pokazały, że recyklingowana tektura ma nieco niższą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu z nową tekturą, ale nadal jest wystarczająco wytrzymała do wielu zastosowań opakowaniowych. Dzięki analizom numerycznym, udało się zoptymalizować konstrukcję opakowań z tej tektury, co pozwoliło na zmniejszenie ilości odpadów i koszty produkcji przy zachowaniu odpowiedniego poziomu ochrony produktów.

Studium przypadku 3: Transport żywności

W przemyśle spożywczym, opakowania z tektury falistej muszą spełniać surowe wymagania dotyczące higieny i ochrony produktów. W jednym z badań, zespół naukowców zastosował homogenizację i symulacje numeryczne do analizy opakowań na świeże owoce i warzywa [19]. Celem było zapewnienie odpowiedniej wentylacji i wytrzymałości opakowań podczas transportu. Dzięki przeprowadzonym analizom, zoptymalizowano konstrukcję opakowań, co pozwoliło na zwiększenie ich wytrzymałości na ściskanie o 15% oraz poprawę cyrkulacji powietrza, co przyczyniło się do wydłużenia trwałości przechowywanych produktów.

Te studia przypadków pokazują, jak ważna jest homogenizacja i metody numeryczne w praktycznych zastosowaniach tektury falistej. Dzięki tym narzędziom, przemysł opakowaniowy może tworzyć bardziej wytrzymałe, ekonomiczne i ekologiczne opakowania, które spełniają wymagania różnych branż.

Wyzwania i przyszłe kierunki

Wyzwania w zastosowaniu homogenizacji

Mimo licznych zalet, zastosowanie homogenizacji w analizie tektury falistej napotyka na szereg wyzwań. Jednym z głównych problemów jest dokładność reprezentacji skomplikowanej struktury tektury falistej. Tektura falista składa się z warstw pofalowanego papieru, które mają złożoną geometrię, a precyzyjne odwzorowanie tych struktur w modelach matematycznych jest trudne. Nawet niewielkie uproszczenia mogą prowadzić do znacznych błędów w prognozowaniu właściwości mechanicznych materiału.



Kolejnym wyzwaniem jest uwzględnienie nieliniowych właściwości materiałowych tektury. Papier, z którego wykonana jest tektura, wykazuje nieliniowe zachowanie pod obciążeniem, w tym histerezę i różnorodność w wytrzymałości w zależności od kierunku włókien. Te właściwości muszą być dokładnie uwzględnione w procesie homogenizacji, co często wymaga zaawansowanych metod numerycznych i dużej mocy obliczeniowej.

Ponadto, proces klejenia warstw tektury falistej i właściwości kleju również mają znaczący wpływ na końcowe właściwości materiału. Homogenizacja musi uwzględniać te aspekty, co w praktyce jest trudne do precyzyjnego modelowania. Zmiany w procesie produkcji, takie jak różnice w grubości kleju czy nierówności w naniesieniu kleju, mogą znacząco wpłynąć na wytrzymałość tektury, co stanowi dodatkowe wyzwanie w analizach.

Przyszłe kierunki badań

W odpowiedzi na te wyzwania, przyszłe badania nad homogenizacją tektury falistej będą koncentrować się na kilku kluczowych obszarach. Po pierwsze, rozwijane będą bardziej zaawansowane modele numeryczne, które mogą dokładniej odwzorować złożoną strukturę tektury falistej. Zastosowanie takich technologii, jak sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe, może pomóc w tworzeniu bardziej precyzyjnych i szybszych algorytmów homogenizacji.

Kolejnym kierunkiem badań będzie rozwój nowych metod eksperymentalnych do kalibracji modeli homogenizacji. Wykorzystanie technik takich jak tomografia komputerowa (CT) i mikroskopia elektronowa może dostarczyć szczegółowych danych o mikrostrukturze tektury, co pozwoli na lepsze zrozumienie jej właściwości mechanicznych i poprawę dokładności modeli numerycznych.

Badania będą również koncentrować się na zrozumieniu wpływu procesów produkcyjnych na właściwości tektury falistej. Lepsze zrozumienie tego, jak zmiany w produkcji wpływają na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne tektury, pozwoli na opracowanie bardziej efektywnych i spójnych metod produkcji. W szczególności, badania nad właściwościami klejów i procesami klejenia mogą znacząco poprawić wytrzymałość i trwałość tektury falistej.

Ponadto, rozwijane będą metody optymalizacji strukturalnej, które pozwolą na projektowanie tektury falistej o lepszych właściwościach mechanicznych przy mniejszym zużyciu materiału. Zastosowanie zaawansowanych technik, takich jak optymalizacja topologiczna, może prowadzić do powstania innowacyjnych struktur tektury, które są zarówno lekkie, jak i wytrzymałe.

Ostatecznie, badania będą dążyć do stworzenia bardziej zrównoważonych materiałów opakowaniowych. Integracja procesów recyklingu i rozwój nowych, biodegradowalnych materiałów do produkcji tektury falistej będą kluczowymi obszarami badań. Dzięki temu przemysł opakowaniowy będzie mógł sprostać rosnącym wymaganiom związanym z ochroną środowiska i zrównoważonym rozwojem.

Podsumowując, mimo obecnych wyzwań, przyszłość homogenizacji i analiz numerycznych tektury falistej wygląda obiecująco.

Rozwój nowych technologii i metod badawczych przyniesie znaczące postępy, które pozwolą na jeszcze lepsze zrozumienie i wykorzystanie tego wszechstronnego materiału.

Wnioski

Podsumowanie głównych punktów

Homogenizacja odgrywa kluczową rolę w analizie i projektowaniu opakowań z tektury falistej, umożliwiając uproszczenie skomplikowanych struktur do modeli jednorodnych o równoważnych właściwościach mechanicznych. Dzięki zastosowaniu różnych metod homogenizacji, takich jak metoda Voigta-Reussa-Hill, metoda Mori-Tanaki oraz metoda samouzgodniona, możliwe jest precyzyjne przewidywanie właściwości tektury falistej, takich jak moduł sprężystości, moduł ścinania i wytrzymałość na ściskanie.

Zastosowanie metod numerycznych, w tym metody elementów skończonych (MES), pozwala na dokładne modelowanie zachowania tektury falistej pod różnymi warunkami obciążeniowymi. Dzięki tym technikom, inżynierowie mogą przeprowadzać zaawansowane analizy wytrzymałościowe i optymalizacyjne, co prowadzi do tworzenia bardziej wytrzymałych i efektywnych opakowań.

Studia przypadków z różnych branż, takich jak przemysł elektroniczny, spożywczy i e-commerce, pokazują praktyczne korzyści płynące z zastosowania homogenizacji i metod numerycznych. Optymalizacja konstrukcji opakowań, zmniejszenie masy i zużycia materiału oraz poprawa ochrony produktów są bezpośrednimi wynikami tych zaawansowanych analiz.

Znaczenie dla przemysłu

Wyniki przeglądu literatury na temat homogenizacji i jej zastosowania w analizie tektury falistej mają istotne znaczenie dla przemysłu opakowaniowego. Dzięki homogenizacji, możliwe jest precyzyjne przewidywanie właściwości mechanicznych opakowań, co pozwala na projektowanie bardziej wytrzymałych i efektywnych produktów. To z kolei przekłada się na lepszą ochronę towarów podczas transportu i przechowywania, zmniejszając ryzyko uszkodzeń i strat finansowych.

Dzięki zaawansowanym metodom numerycznym, takim jak MES, przemysł opakowaniowy może szybko i dokładnie analizować różne scenariusze obciążeniowe, co przyspiesza proces projektowania i pozwala na wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań. To szczególnie ważne w kontekście rosnących oczekiwań klientów dotyczących jakości i trwałości opakowań, jak również w świetle coraz bardziej rygorystycznych standardów dotyczących ochrony środowiska.

Zastosowanie technik optymalizacji strukturalnej umożliwia tworzenie opakowań, które są nie tylko bardziej wytrzymałe, ale także lżejsze i bardziej ekonomiczne. Redukcja zużycia materiałów nie tylko obniża koszty produkcji, ale również zmniejsza wpływ na środowisko, co jest kluczowe w kontekście globalnych wysiłków na rzecz zrównoważonego rozwoju.



Wreszcie, integracja procesów recyklingu i rozwój nowych, biodegradowalnych materiałów do produkcji tektury falistej pozwalają przemysłowi opakowaniowemu na odpowiedź na rosnące zapotrzebowanie na ekologiczne rozwiązania. Dzięki temu, firmy mogą spełniać wymagania legislacyjne i oczekiwania konsumentów, jednocześnie przyczyniając się do ochrony środowiska.

Podsumowując, zastosowanie homogenizacji i zaawansowanych metod numerycznych w analizie tektury falistej przynosi liczne korzyści dla przemysłu opakowaniowego. Pozwala na tworzenie bardziej wytrzymałych, efektywnych i ekologicznych opakowań, co ma kluczowe znaczenie dla zrównoważonego rozwoju i konkurencyjności na rynku.

Artykuł recenzowany

LITERATURA

- [1] Aboura Z., Talbi N., Allaoui S., Benzeggagh M. L. 2004. "Elastic behavior of corrugated cardboard: Experiments and modeling". *Composite Structures* 63 (1) : 53-62. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00131-4)
- [2] Altmann R., Henning P., Peterseim D. 2021. "Numerical homogenization beyond scale separation". *Acta Numerica* 30, 1-86. <https://doi.org/10.1017/S0962492921000015>
- [3] Andrianov I. V., Awrejcewicz J., Danishevskyy V. V. 2018. "Conductivity of fibre composites: Analytical homogenization approach". In *Advanced Structured Materials* (Vol. 77). https://doi.org/10.1007/978-3-319-65786-8_3
- [4] Annin B. D., Kolpakov A. G., Rakin S. I. 2017. "Homogenization of corrugated plates based on the dimension reduction for the periodicity cell problem". In *Advanced Structured Materials* (Vol. 46). https://doi.org/10.1007/978-3-319-56050-2_3
- [5] Bartolozzi G., Baldanzini N., Pierini M. 2014. "Equivalent properties for corrugated cores of sandwich structures: A general analytical method". *Composite Structures* 108 (1) : 736-746. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.012>
- [6] Bartolozzi G., Pierini M., Orrenius U., Baldanzini N. 2013. "An equivalent material formulation for sinusoidal corrugated cores of structural sandwich panels". *Composite Structures* 100, 173-185. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.12.042>
- [7] Battaglia G., Matteo A. D., Pirrotta A., Micale G. 2017. "Dynamic response of equivalent orthotropic plate model for stiffened plate: Numerical-experimental assessment". *Procedia Engineering* 199, 1423-1428. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.387>
- [8] Beck M., Fischerauer G. 2022. "Modeling Warp in Corrugated Cardboard Based on Homogenization Techniques for In-Process Measurement Applications". *Applied Sciences (Switzerland)* 12 (3). <https://doi.org/10.3390/app12031684>
- [9] Biancolini M. E. 2005. "Evaluation of equivalent stiffness properties of corrugated board". *Composite Structures* 69 (3) : 322-328. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.07.014>
- [10] Blanc X., le Bris C., Legoll F. 2016. "Some variance reduction methods for numerical stochastic homogenization. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 374 (2066). <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0168>
- [11] Buannic N., Cartraud P., Quesnel T. 2003. "Homogenization of corrugated core sandwich panels". *Composite Structures* 59 (3) : 299-312. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00246-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00246-5)
- [12] Cheon Y.-J., & Kim H.-G. 2015. "An equivalent plate model for corrugated-core sandwich panels". *Journal of Mechanical Science and Technology* 29 (3) : 1217-1223. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0235-6>
- [13] Cornaggia A., Gajewski T., Knitter-Piątkowska A., Garbowski T. 2023. "Influence of Humidity and Temperature on Mechanical Properties of Corrugated Board-Numerical Investigation". *BioResources* 18 (4) : 7490-7509. <https://doi.org/10.15376/biores.18.4.7490-7509>
- [14] Doghri I., el Ghezal M. I., Adam L. 2016. "Finite strain mean-field homogenization of composite materials with hyperelastic-plastic constituents". *International Journal of Plasticity*, 81, 40-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.01.009>
- [15] Duong P. T. M. 2017. "Analysis and simulation for the double corrugated cardboard plates under bending and in-plane shear force by homogenization method". *International Journal of Mechanics* (11) : 176-181.
- [16] Efendiev Y., Kronsbein C., Legoll F. 2015. "Multilevel monte carlo approaches for numerical homogenization". *Multiscale Modeling and Simulation* 13 (4) : 1107-1135. <https://doi.org/10.1137/130905836>
- [17] Eidel B., Fischer A. 2018. "The heterogeneous multiscale finite element method for the homogenization of linear elastic solids and a comparison with the FE2 method". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 329, 332-368. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.10.001>
- [18] Faraci D., Comi C. 2021. "Asymptotic homogenization of metamaterials elastic plates". *Journal of Physics: Conference Series* 2015 (1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2015/1/012038>
- [19] <http://www.fematsystems.pl>
- [20] Frénod E. 2015. "An attempt at classifying homogenization-based numerical methods. Discrete and Continuous Dynamical Systems" – Series S, 8(1), i-vi. <https://doi.org/10.3934/dcdss.2015.8.1i>
- [21] Garbowski T., Gajewski T. 2021. "Determination of transverse shear stiffness of sandwich panels with a corrugated core by numerical homogenization". *Materials* 14 (8). <https://doi.org/10.3390/ma14081976>
- [22] Garbowski T., Jarmuszczyk M. 2014. "Homogenization of corrugated board. Part 2. Numerical homogenization". *Przegląd Papierniczy* 70 (7) : 390-394.
- [23] Garbowski T., Jarmuszczyk M. 2014. "Homogenization of corrugated paperboard. Part 1. Analytical homogenization". *Przegląd Papierniczy* 70 (6) :345-349.
- [24] Garbowski T., Jarmuszczyk M. 2014. "Numerical strength estimate of corrugated board packages. Part 1. Theoretical assumptions in numerical modeling of paperboard packages". *Przegląd Papierniczy* 70 (4) : 219-222.



- [25] Garbowski T., Jarmuszczyk M. 2014. „Numerical strength estimate of corrugated board packages. Part 2. Experimental tests and numerical analysis of paperboard packages”. *Przegląd Papierniczy* 70 (5) :277-281.
- [26] Garbowski T., Knitter-Piątkowska, A., & Mrówczyński, D. (2021). Numerical homogenization of multi-layered corrugated cardboard with creasing or perforation. *Materials* 14 (14). <https://doi.org/10.3390/ma14143786>
- [27] Garbowski T., Marek A. 2014. “Homogenization of corrugated boards through inverse analysis”. OPT-i 2014 - 1st International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization, Proceedings.
- [28] Griso G. 2014. “Error estimates in periodic homogenization with a non-homogeneous Dirichlet condition”. *Asymptotic Analysis* 87 (1–2) 91–121. <https://doi.org/10.3233/ASY-131200>
- [29] Hawa T., Ahmed C. D. 2021. “Third-Order Corrections in Periodic Homogenization for Elliptic Problem”. *Mediterranean Journal of Mathematics* 18 (4). <https://doi.org/10.1007/s00009-021-01727-3>
- [30] Luong V. D., Abbas F., Hoang M. P., Duong P. T. M., Abbas B. 2021. “Finite element elastoplastic homogenization model of a corrugated-core sandwich structure”. *Steel and Composite Structures* 41 (3) : 437–445. <https://doi.org/10.12989/scs.2021.41.3.437>
- [31] Mahnken R., Ju X. 2020. “Goal-oriented adaptivity based on a model hierarchy of mean-field and full-field homogenization methods in linear elasticity”. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 121 (2) : 277-307. <https://doi.org/10.1002/nme.6209>
- [32] Marek A., Garbowski T. 2015. “Homogenization of sandwich panels”. *Computer Assisted Methods in Engineering and Science* 22 (1).
- [33] Maurel A., Pham K., Marigo J.-J. 2019. “Homogenization of thin 3D periodic structures in the time domain - effective boundary and jump conditions. In Fundamentals and Applications of Acoustic Metamaterials: From Seismic to Radio Frequency”. <https://doi.org/10.1002/9781119649182.ch4>
- [34] Meng L., Lan X., Zhao J., Wang Z. 2020. “Equivalent models and mechanical properties of bio-inspired corrugated sandwich structures subjected to bending loads”. *Composite Structures* 244. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112257>
- [35] Mityushev V. 2022. “Effective properties of two-dimensional dispersed composites. Part II. Revision of self-consistent methods”. *Computers and Mathematics with Applications* 121, 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2022.07.003>
- [36] Mrówczyński D., Garbowski T. 2023. “Influence of Imperfections on the Effective Stiffness of Multilayer Corrugated Board”. *Materials* 16 (3). <https://doi.org/10.3390/ma16031295>
- [37] Mrówczyński D., Knitter-Piątkowska A., Garbowski T. 2022. „Numerical Homogenization of Single-Walled Corrugated Board with Imperfections”. *Applied Sciences (Switzerland)* 12 (19). <https://doi.org/10.3390/app12199632>
- [38] Mrówczyński D., Pozorska J., Garbowski T., Pozorski Z. 2023. „Bending Stiffness of Unsymmetrical Multilayered Corrugated Board: Influence of Boundary Conditions”. *BioResources* 18 (4) : 7611-7628. <https://doi.org/10.15376/biores.18.4.7611-7628>
- [39] Pandit U. K., Mondal G., Punera D. 2023. “Lateral torsional buckling analysis of corrugated steel web girders using homogenization approach”. *Journal of Constructional Steel Research* 210. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108099>
- [40] Park K.-J., Jung K., Kim, Y.-W. 2016. “Evaluation of homogenized effective properties for corrugated composite panels”. *Composite Structures*, 140, 644–654. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.002>
- [41] Pivovarov D., Zabiĥyan R., Mergheim J., Willner K., Steinmann P. 2019. “On periodic boundary conditions and ergodicity in computational homogenization of heterogeneous materials with random microstructure”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 357. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.07.032>
- [42] Suarez B., Muneta L. M., Romero G., Sanz-Bobi J. D. 2021. “Efficient design of thin wall seating made of a single piece of heavy-duty corrugated cardboard”. *Materials* 14 (21). <https://doi.org/10.3390/ma14216645>
- [43] Suarez B., Muneta M. L. M., Sanz-Bobi, J. D., Romero G. 2021. „Application of homogenization approaches to the numerical analysis of seating made of multi-wall corrugated cardboard”. *Composite Structures* 262. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113642>
- [44] Szewczyk, W., Głowacki, K. 2014. „Effect of humidity on paper and corrugated board strength parameters | Wpływ wilgotności na wskaźniki wytrzymałościowe tektury falistej”. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 22 (5) : 133-137.
- [45] Yanes V., Sabina F. J., Espinosa-Almeyda Y., Otero J. A., Rodríguez-Ramos R. 2022. „Asymptotic homogenization approach applied to Cosserat heterogeneous media. In Mechanics and Physics of Structured Media: Asymptotic and Integral Equations Methods of Leonid Filshinsky”. <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-390543-5.00026-8>